

LES OLIGO-ELEMENTS : DU « FEED » AU « FOOD » ET DE L'AJUSTEMENT DES APPORTS CHEZ LES VOLAILLES A LA VALORISATION DES PRODUITS EN ALIMENTATION HUMAINE

Narcy Agnès, Elisabeth Baéza, Nys Yves

INRA UR83 Recherches avicoles, 37380 NOUZILLY, France
agnes.narcy@inra.fr

RÉSUMÉ

L'apport d'oligo-éléments chez les oiseaux est essentiel pour le bon fonctionnement de l'organisme. Cependant, leur apport est souvent excédentaire par rapport au besoin de l'animal et la majeure partie est excrétée pouvant constituer un risque pour l'environnement. Dès lors, les apports doivent être précisément maîtrisés ce qui implique d'avoir une bonne connaissance de leurs impacts multiples, y compris sur la qualité des produits. En effet, de par leur implication dans diverses fonctions physiologiques et leur capacité à être stockés dans les tissus, les oligo-éléments peuvent influencer les caractéristiques nutritionnelle, organoleptique et technologique de la viande et des œufs. Notons toutefois qu'en fonction des apports et du statut de l'animal, les dynamiques d'absorption, de dépôt et d'excrétion des oligo-éléments vont être modulées par un enchaînement complexe de processus homéostatiques. Des travaux ont montré qu'il était possible d'enrichir significativement la viande et les œufs en certains oligo-éléments tels que le sélénium, l'iode ou le fer. L'oxydation post-mortem des tissus peut conduire à une détérioration des qualités organoleptiques et technologiques de la viande. Certaines études rapportent un effet positif de l'apport d'oligo-éléments (essentiellement sélénium) sur la stabilité à l'oxydation et les pertes en eau associées au cours du stockage et de la transformation. Cependant, ces effets demeurent complexes et controversés. La prise en compte de critères de qualité en relation avec l'apport d'oligo-éléments lors de la formulation des aliments pourrait donc être pertinente à condition d'évaluer plus précisément leurs bénéfices et l'impact environnemental associé.

ABSTRACT

Trace-elements: from “feed” to “food” – Adjustment of dietary supply in poultry and their impacts on product's quality

The supply of trace elements in poultry feed is essential for the maintenance of body functions. However, their intakes are often in excess regarding animal requirements and most is excreted being risky for the environment. Consequently, their inputs must be precisely controlled implying a good knowledge of their multiple impacts, including those on product's quality. Indeed, through their involvement in various physiological functions and their ability to be stored in tissues, trace elements can influence the nutritional, organoleptic and technological characteristics of meat and eggs. It should be noted that depending on their inputs and on the status of the animal, dynamics of absorption, deposition and excretion of trace elements are modulated by homeostatic processes. Studies have shown that it is possible to significantly enrich meat and eggs in trace elements such as selenium, iodine or iron. The post-mortem oxidation of tissues may induce deterioration of organoleptic and technological characteristics of the meat. Some studies have reported a positive effect of trace elements (mainly selenium) on the oxidative stability and drip losses of the meat during storage and processing. However, these effects remain complex and controversial. Including quality criteria in relation to trace element's supply in the process of feed formulation may be relevant if their benefits are more clearly defined as well as their environmental impact.

INTRODUCTION

Les oligo-éléments participent à de nombreuses fonctions physiologiques. Cependant, leur apport est souvent excédentaire par rapport au besoin de croissance de l'animal et tout excès est excrété pouvant constituer un risque pour l'environnement (phytotoxicité). Leurs apports doivent donc être précisément maîtrisés mais la mise en place de nouvelles réglementations implique d'avoir une bonne connaissance de leurs impacts, y compris sur la qualité des produits. Les critères de qualité et d'effets «santé» potentiels des produits influencent grandement les choix alimentaires des consommateurs. Or, la qualité nutritionnelle des produits et leurs caractéristiques organoleptiques et technologiques sont en partie dépendantes de l'alimentation distribuée aux animaux. C'est notamment le cas des oligo-éléments pour lesquels une supplémentation sous forme minérale ou organique est systématique, une ration de base ne permettant pas de couvrir les besoins. Au-delà des besoins préconisés pour la croissance, les apports en oligo-éléments sont reconnus pour affecter des critères de qualité de la viande, et la solidité de la coquille d'œuf. De plus, la viande et les œufs, de par leur capacité à s'enrichir en certains oligo-éléments, peuvent être utilisés comme vecteurs de supplémentation en alimentation humaine. Cependant, toute augmentation des apports en oligo-éléments favorise leur rejet dans l'environnement avec une diminution de l'efficacité de leur dépôt corporel notamment pour les éléments les plus à risque pour l'environnement (cuivre, Cu et zinc, Zn). Ce phénomène est lié, en particulier, aux processus homéostatiques destinés à maintenir l'organisme dans un état d'équilibre métabolique.

Cette revue a pour objectif de rappeler les diverses fonctions biologiques dépendantes de l'apport d'oligo-éléments chez l'oiseau et d'appréhender plus avant leurs effets sur la qualité des produits avicoles. Il s'agira ensuite d'explicitier les voies de maintien de l'homéostasie et les conséquences sur leurs dynamiques de dépôt et d'excrétion. Finalement, seront présentés les principaux effets avérés des oligo-éléments en termes d'enrichissement et de qualité organoleptique et technologique des produits.

1. FONCTIONS DES OLIGO-ELEMENTS DANS L'ORGANISME

Les oligo-éléments représentent une fraction mineure des éléments minéraux de l'organisme. A titre comparatif, la teneur corporelle de Zn et Cu est de l'ordre de 21 et 1,7 mg/kg pour un poulet standard, contre 12 et 5,0 g/kg pour le calcium et le phosphore, respectivement (CORPEN, 2013). Bien qu'ils soient présents en faible quantité, ils interviennent dans de

nombreuses fonctions biologiques ce qui leur confère, pour la plupart, un caractère essentiel (Suttle, 2010).

1.1. Fonctions métaboliques

Les oligo-éléments ne sont généralement pas présents à l'état d'ions libres dans l'organisme. Ils sont transportés ou stockés liés à des protéines et se combinent à des enzymes modulant ainsi leur conformation et leur activité. Cette liaison est généralement très spécifique d'un métal pour une enzyme donnée. L'élément se comporte ainsi comme un cofacteur indispensable à l'activité de l'enzyme, jouant un rôle catalytique, structural ou régulateur. Un grand nombre de métallo-enzymes a été identifié dont plus de 300 pour le seul atome de Zn (O'Dell, 1992). A ce titre, il intervient dans de nombreux métabolismes biologiques (lipides, glucides, protéines, ADN...). Ces métallo-enzymes appartiennent aux différentes classes des oxydoréductases, transférases, hydrolases, lyases, isomérases et ligases. Dans le sang, la majorité de Zn est sous forme d'anhydrase carbonique qui joue un rôle clé dans le transport du dioxyde de carbone des tissus aux poumons pour assurer son élimination. Un apport inadéquat de Zn peut endommager les fonctions cellulaires en influençant la synthèse de l'ADN et de l'ARN de même que l'expression des gènes (altération ADN ou structure de la chromatine). Le zinc agit également comme cofacteur des phosphatases alcalines et des collagénases et joue à ce titre un rôle essentiel dans la croissance osseuse.

Le cuivre est quant à lui un constituant de la cytochrome c oxydase, enzyme terminale de la chaîne respiratoire, de la lysyl oxydase, indispensable à la structuration de l'élastine et du collagène, et de la dopamine- β -monooxygénase, nécessaire à la production de catécholamines (Jondreville et al., 2002 ; Suttle, 2010).

Certains oligo-éléments participent directement à la structure moléculaire d'hormones leur conférant leur conformation optimale. L'iode fait par exemple partie intégrante des hormones thyroïdiennes (T3 et T4) par liaisons covalentes. Le zinc stabilise quant à lui la structure tertiaire d'hormones peptidiques (insuline, thymuline). Il serait également indispensable à la structuration opérationnelle de protéines appelées «protéines à doigt de Zn» impliquées dans la régulation de l'expression des gènes. On retrouve parmi elles des récepteurs hormonaux (stéroïdes ou acide rétinoïque) et de nombreux facteurs de croissance ou de transcription.

1.2. Fonctions de défense

La production excessive de radicaux libres de l'oxygène (ex : anion superoxyde) au travers de l'activité métabolique de l'organisme (ex : chaîne respiratoire mitochondriale, auto-oxydation ou oxydation par le cytochrome P450) génère un stress

oxydant. Ces espèces radicalaires sont hautement instables et réactives peuvent endommager irréversiblement l'ADN, les protéines (inactivation d'enzymes) ou les lipides (membrane cellulaire). Les métaux de transition peuvent être des catalyseurs puissants des oxydations biologiques. Aussi, les protéines de liaisons de ces éléments (transferrine, lactoferrine, métallothionéines, céruloplasmine, ferritine, albumine) constituent une première ligne de défense contre le stress oxydant. Dans le plasma, la majorité du Cu est lié à la céruloplasmine. Cette dernière catalyse l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique pour faciliter son intégration dans la transferrine, sa principale protéine de transport dans l'organisme, et dans la ferritine, protéine de réserve (Mertz, 1987).

De plus, pour maintenir leur intégrité, les cellules sont pourvues d'un système de défense enzymatique anti-radicalaire (Surai, 2016) comprenant les superoxydes dismutases à Cu et Zn (Cu, Zn-SOD, cytosolique), ou à manganèse (Mn-SOD, mitochondriale), et les glutathions peroxydases sélénio-dépendantes (Se-GSH-Px). Toutes ces enzymes utilisant comme cofacteurs des oligo-éléments sont présentes en quantité variable dans de nombreux tissus. Dans le muscle, l'activité de la Mn-SOD et de la Se-GSH-Px est inférieure à celle des autres tissus (Tableau 1). L'activité de la Cu,Zn-SOD est, en revanche, plus importante au niveau musculaire.

Tableau 1. Activités enzymatiques anti-oxydantes (oligo-éléments dépendantes) de différents tissus chez le jeune poussin

Tissu	Mn-SOD, U/mg protéine	Cu,Zn-SOD, U/mg protéine	Se-GSH- Px, U/mg protéine
Foie	3,81 ^a	1,46 ^a	177 ^a
Rein	2,98 ^b	3,15 ^b	160 ^a
Coeur	5,79 ^c	2,73 ^b	99,0 ^b
Poumon	0,09 ^d	5,79 ^c	99,8 ^b
Muscle	1,06 ^d	6,07 ^c	45,8 ^c
MV	0,12 ^c	6,97 ^c	103 ^b

MV : membrane vitelline

Surai, 2016

Une baisse de l'activité de la Mn-SOD est observée au niveau cardiaque suite à une déficience en Mn chez le poulet en croissance (Li et al., 2004 ; Luo et al., 1991 ; 1992). De plus, une supplémentation en Mn augmente l'expression des ARNm et de l'activité de la Mn-SOD dans le filet, la cuisse et le cœur (Li et al., 2011 ; Lu et al., 2007). Les excès de Mn peuvent toutefois s'avérer toxiques avec une baisse de l'activité des SOD au niveau sanguin et dans les organes de l'immunité (Liu et al., 2013). Chez des poulets supplémentés en Cu, l'activité de la Cu, Zn-SOD est augmentée dans le foie, les érythrocytes, le rein et le cœur de même que celle de la Mn-SOD dans le cœur (Aydemir et al., 2000 ; Ozturk-Urek et al., 2001). Une supplémentation en sélénium (Se) stimule

l'activité des SOD, GSH-Px et catalase dans divers tissus tels que le sérum, le thymus, le foie et le muscle (Jing et al., 2015 ; Xu et al., 2014 ; Zhang et al., 2012). Un excès peut toutefois inverser cette tendance.

Le zinc et le Cu joueraient également un rôle dans le maintien des fonctions immunitaires (Park et al., 2004b ; Percival, 1998). Une supplémentation en Zn sous forme organique chez le poulet a amélioré la réponse cellulaire et humorale à une vaccination (Richards et al., 2010).

2. DYNAMIQUES DES FLUX ET MAINTIEN DE L'HOMÉOSTASIE

Il existe une fenêtre d'apport en oligo-éléments dans laquelle l'organisme est capable de maintenir un état d'équilibre ou de stabilité. Le contrôle des cinétiques d'absorption, de distribution, de stockage et d'excrétion de ces éléments permet d'aboutir à un environnement interne stable et optimal quant à leurs fonctions métaboliques. L'organisme s'adapte donc, dans une certaine mesure, à des situations de manque ou à l'inverse de surcharge. La capacité des organismes à maintenir l'homéostasie dépend fortement de l'espèce considérée. A cet égard, le poulet et la caille semblent peu efficaces par rapport au rat, à la souris ou aux ruminants. L'homéostasie est maintenue au travers de systèmes de contrôle dynamiques impliquant des mécanismes de rétroaction négative.

Les oligo-éléments peuvent être répartis en deux groupes en fonction de leur voie prioritaire d'excrétion endogène. Pour les éléments cationiques (Cu, Fe, Mn et Zn), l'homéostasie est dépendante de l'absorption et de l'excrétion fécale endogène contrôlée par l'intestin, le foie et le pancréas, alors que pour les éléments anioniques (Se, I) l'excrétion rénale est la voie majoritaire (Buckley, 2000). Les réponses à des changements d'apport alimentaire varient notamment avec le niveau d'apport, la plupart des éléments ayant des sites spécifiques de stockage.

Le tractus gastro-intestinal est le site majeur de régulation de l'homéostasie de Zn. Les mécanismes impliquent l'ajustement conjoint de l'absorption et de l'excrétion endogène au niveau fécal (King et al., 2000). En cas d'augmentation des apports alimentaires de Zn, l'excrétion endogène par le tractus gastro-intestinal est la principale voie de maintien de l'homéostasie et vient compléter la baisse initiale d'absorption. L'élimination urinaire de Zn demeure quant à elle une voie mineure. Dans l'iléon, l'absorption de Zn est médiée par un processus non-saturable de diffusion (Yu et al., 2008). Dans le duodénum et le jéjunum, l'absorption de Zn est dépendante d'un processus saturable médié par différents transporteurs régulés par l'apport alimentaire. Parmi ces derniers, ZnT5 et ZnT1

seraient impliqués de même que des métallothionéines (MT). Une supplémentation en Zn a pour effet d'augmenter l'expression des ARNm des MT dans les trois segments digestifs suggérant une augmentation de la capacité de séquestration du Zn dans les entérocytes. Par le biais des phénomènes de desquamation, la quantité de Zn entrant dans la muqueuse est supérieure à celle transportée dans le plasma. Une baisse de l'expression des ARNm de ZnT5 a également été observée dans l'iléon en présence d'un excès de Zn (Yu et al., 2008). Les sources de Zn endogène dans le tractus gastro-intestinal incluent la salive et les sécrétions gastriques, pancréatiques, biliaires et intestinales. Parmi elles, les sécrétions pancréatiques semblent quantitativement prédominantes.

Des apports élevés de Zn se traduisent par une accumulation de l'élément dans le tibia, le foie, l'intestin grêle, la peau et les plumes sans que la teneur dans les muscles ne soit modifiée. Le tibia et l'intestin grêle sont les sites de stockage quantitativement les plus importants (Emmert et Baker, 1995). En situation de déficience, le Zn accumulé dans l'os, le foie et l'intestin peut être mobilisé. La mobilisation osseuse semble toutefois plus lente que pour les deux autres tissus.

De la même façon que pour le Zn, le Cu absorbé par voie active et saturable peut se lier à des métalloprotéines (MT) dans le cytosol des entérocytes. En cas de surcharge alimentaire, les MT pourraient ainsi jouer un rôle dans la séquestration du Cu. De plus, l'excrétion endogène et l'accumulation hépatique sont les deux voies majoritaires de maintien de l'homéostasie en cas d'augmentation des apports de Cu (Aoyagi et Baker, 1993 ; Funk et Baker, 1991). Cet équilibre est maintenu principalement par une augmentation des pertes endogènes de Cu via la bile, sous forme de protéines, sels biliaires, peptides ou acides aminés (Rosenblum et Leach, 1985). Il s'agit d'un système particulièrement efficace puisque le Cu d'origine biliaire est très peu réabsorbé (Aoyagi et Baker, 1993).

En cas d'apports très élevés, le manganèse pourrait s'accumuler de façon linéaire dans l'os, le foie, le rein, le pancréas et le muscle, de même que dans les plumes et la peau. Dans ces conditions, l'excrétion endogène de Mn augmente avec l'apport alimentaire indiquant qu'il existerait une régulation (Buckley, 2000). Dans le cas du fer (Fe), le maintien de l'homéostasie passe majoritairement par un ajustement du taux d'absorption. L'organisme a une capacité limitée à excréter le fer si bien que l'excrétion endogène via les fèces ou l'urine joue un rôle négligeable. A l'inverse, pour le Se, qu'il soit sous forme minérale ou organique, l'élimination urinaire est la voie prépondérante.

3. IMPACT SUR LA QUALITE DES PRODUITS

3.1. Qualité de l'œuf

3.1.2. Enrichissement

La composition de l'œuf en éléments majeurs est relativement stable contrairement aux éléments mineurs tels que les oligo-éléments ou les vitamines. La plupart des oligo-éléments sont déposés dans le jaune, tandis que leur accumulation dans le blanc reste limitée. La teneur en oligo-éléments des œufs est directement liée à l'ingéré avec des enrichissements possibles en Se et iode (I), et dans une moindre mesure en Fe, Zn, fluor et manganèse (Bouvarel et al., 2011 ; Klasing, 2000 ; Schiavone et Barroeta, 2011).

Parmi l'ensemble des oligo-éléments, le sélénium est le plus étudié. La charge maximale en Se réglementaire pour un aliment poule ne peut excéder 0,5 ppm (réglementation UE ; Tableau 2) bien qu'aucun effet nocif n'a été observé jusqu'à 5 ppm. Le seuil de toxicité est estimé à 10 ppm. Le sélénium est généralement apporté sous forme de sélénite ou sélénate de sodium (Na_2SeO_3 , Na_2SeO_4) préférentiellement déposé dans le jaune ou sous forme de sélénométhionine ou levures enrichies en Se transféré dans l'albumen. Une supplémentation en Se de 0,3 ppm sous forme de levures enrichies (Se régime basal: 0,4 ppm) a permis de multiplier par 2 la teneur en Se du jaune et par 4 celle de l'albumen (Chinrasri et al., 2009). La charge en Se pour un œuf est ainsi passée de 18 à 43 µg. La supplémentation d'un régime de poules pondeuses (Se régime de base = 0,3 ppm) à hauteur de 1, 2 ou 5 ppm de Se pendant 4 semaines sous forme de levures enrichies, augmente linéairement la teneur de l'œuf sans effet négatif sur les performances de production et le bien-être (Bennett et Cheng, 2010). Le contenu en Se de l'œuf évolue de 17 à 52, 98 et 190 µg. Une supplémentation en Se (0,2 ppm) sous forme d'acide 2-hydroxy-4-méthylsélénobutanoïque est plus efficace que des levures sélénées pour augmenter le contenu en Se de l'œuf (Jlali et al., 2013). La consommation d'un œuf de poule nourrie avec un régime supplémenté en Se organique au niveau réglementaire permet de couvrir environ 40% des ANC en Se de l'adulte (55 µg/jour en moyenne). Les œufs enrichis en Se représentent un vecteur efficace pour améliorer le statut en Se des populations (Surai et al., 2007). Il est, en effet, un aliment traditionnel et abordable dans la plupart des pays. Il représente un système sécurisé pour l'alimentation humaine puisque pour atteindre le seuil de toxicité du Se, il faudrait consommer 30 œufs par jour et ce, de façon prolongée.

Le contenu en I d'un œuf est de l'ordre de 4-10 µg majoritairement présent dans le jaune. Le jaune est 8 fois plus concentré en I que le blanc. L'iode est apporté dans l'alimentation principalement sous forme inorganique (iodate de calcium ou iodate de potassium). Le besoin en I pour les volailles est

estimé à 0,3-0,4 ppm et le seuil de toxicité à 300-400 ppm (Suttle, 2010). Un maximum de 5 ppm d'I est autorisé dans le régime des poules pondeuses. L'EFSA recommande, néanmoins, une baisse à 3 ppm. La teneur en I de l'œuf augmente de façon linéaire avec l'apport alimentaire et peut être multiplié par 5 et par 7 dans le jaune et l'albumen, respectivement, après une supplémentation en iodate de Ca de 20 ppm (Saki et al., 2012). Une supplémentation en I de 1 à 2 ppm sous forme de levures enrichies a permis d'augmenter de près de 2 fois le contenu en I du jaune (17 µg). En supplémentant le régime des poules à raison de 0, 3 et 6 ppm d'I (iodate de calcium), le contenu de l'œuf a été augmenté de 10 à 16 et 26 µg sans affecter les performances de production (Yalcin et al., 2004). Le contenu en I d'un œuf correspond à environ 15% du besoin chez l'homme, estimé en moyenne à 150 µg par jour.

Une augmentation de la teneur alimentaire de Zn (de 30 à 250 ppm) se traduit par un dépôt supplémentaire de Zn dans l'œuf de 25% et atteint plus de 50% dans le cas d'excès (>1500 ppm) (Stahl et al., 1988).

Classiquement, un œuf contient 1-2 mg de Fe. Le besoin en Fe des volailles est estimé à 50-120 ppm avec un seuil de toxicité de 2000 ppm. L'enrichissement des œufs en Fe est limité à 10-20% lorsque les poules reçoivent un régime contenant 100, 200 et 300 ppm de Fe sous forme de sulfate ou de chélates avec la méthionine (Park et al., 2004a).

3.2.1. Solidité de la coquille

Le manganèse et le Cu sont reconnus comme essentiels pour la formation de la coquille. Une déficience en ces éléments peut en effet entraîner une altération des propriétés biochimiques et mécaniques de la coquille (Chowdhury, 1990 ; Leach et Gross, 1983). Une déficience en Cu chez la poule pondeuse a pour effet de perturber le système de synthèse protéique affectant la taille et la forme des œufs ainsi que la texture de la coquille (Chowdhury, 1990). Le manganèse est un composé de la Galβ1, 3-glucuronosyltransférase (GlcAT-I) impliquée dans la synthèse des protéoglycanes. Une supplémentation en Mn améliore la synthèse des glycosaminoglycanes dans la coquille et pourrait influencer par ce biais sa microarchitecture et sa force à la rupture (Xiao et al., 2014). Le Mn pourrait également influencer l'élongation des cristaux de calcite (Mann et al., 1993).

Le Zn est un composant de l'anhydrase carbonique reconnue pour son rôle clé au niveau de l'utérus dans la fourniture des carbonates de la coquille. L'inhibition de cette enzyme détériore la sécrétion d'ions bicarbonate et conduit, par conséquent, à une réduction importante du poids de coquille (Nys et al., 1999). Cependant, l'effet positif d'apports élevés de Zn (au-delà du besoin) demeure, quant à lui, peu évident.

3.2. Qualité des viandes

3.2.1. Enrichissement

Il est possible d'enrichir la viande de volaille en certains oligo-éléments comme le Se ou le Fe. Chez des canards nourris avec des régimes supplémentés en Se (0, 0,2 et 0,6 ppm) pendant 49 jours, la teneur en Se du filet, de la cuisse et du foie augmentent de 0,05 à 0,87, de 0,04 à 0,64 et de 0,15 à 0,93 mg/kg respectivement (Baltic et al., 2015). Les sources organiques sont plus efficacement transférées que les sources inorganiques (Briens et al., 2013). Une augmentation de la teneur en Se a également été observée dans la viande de dinde et de poulet (filet) nourris avec un régime supplémenté en sélénométhionine en remplacement du sélénate de sodium (Downs et al., 2000 ; Osman et Latshaw, 1976).

Il est également possible d'enrichir la viande de volaille en Fe. Selon l'OMS, la carence en Fe est le trouble nutritionnel le plus commun et le plus répandu dans le monde. Elle touche un grand nombre d'enfants et de femmes dans les pays en développement et sa prévalence est élevée dans les pays industrialisés. Assurer des apports en Fe suffisants aux populations représente donc un véritable enjeu. Les produits carnés constituent la principale source alimentaire de Fe qui est 2,5 fois plus assimilable que celui issu des produits végétaux et des produits laitiers (Hunt, 2003). La viande de volailles est intrinsèquement moins concentrée en Fe que la viande bovine. Cependant, en modulant les apports, il apparaît possible d'enrichir la teneur en Fe de la viande de poulet qui est variable en fonction du compartiment considéré. En effet, d'après les travaux de Seo et al. (2008), le teneur en Fe de la cuisse est trois fois plus élevée que celle du filet et de l'aile (14-15 vs 46 mg/kg). En moyenne, le foie est 17 fois plus concentré que les tissus musculaires (430 mg/kg). Une supplémentation en Fe lié à la méthionine (100 et 200 ppm) augmente le contenu en Fe du filet (+39%), de la cuisse (+25%) et du foie (+32%) par rapport au témoin non-supplémenté. La même supplémentation sous forme minérale (FeSO₄) est moins efficace : seule la supplémentation à hauteur de 200 ppm a un effet positif sur la teneur en Fe de la cuisse (+13%) et du foie (+17%). Les apports nutritionnels conseillés ont été estimés à 9 mg/j pour l'homme et à 16 mg/j pour la femme non ménopausée. Ils varient de 7 à 14 mg/jour chez les enfants de 3 à 17 ans. On peut donc estimer qu'une portion de 100 g de viande de poulet permet de couvrir environ 25% du besoin pour un adulte.

Il faut, toutefois, rappeler que le rôle du Fe est versatile. A l'état libre, il est susceptible de catalyser l'oxydation de biomolécules (ADN, protéines, lipides) pouvant impacter les qualités organoleptiques et technologiques des produits. Dans ce cadre, les protéines de liaison du Fe vont jouer un rôle régulateur clé (Min et Ahn, 2005). Aussi, l'enrichissement de la viande en Fe doit également

être réfléchi au regard des effets potentiels sur les phénomènes d'oxydation.

3.2.2. Qualité organoleptique

L'apport d'oligo-éléments pourrait influencer la teneur et la composition en acides gras et cholestérol de la viande de même que sa capacité anti-oxydante. Par ce biais, ils pourraient jouer sur les qualités organoleptiques des produits telles que la flaveur ou le goût. Notons également que les stratégies de modulation de la composition en acides gras (et du ratio n-6 : n-3) de la viande de poulet suscitent un intérêt croissant. L'apport en acides gras saturés est en effet considéré comme un facteur de risque majeur dans l'étiologie des maladies cardio-vasculaires chez l'homme.

L'apport de Cu, au-delà des besoins nutritionnels, semble moduler la composition lipidique de la viande. Une supplémentation en Cu (Cu-glycine) à raison de 175 ppm réduit la teneur en cholestérol et acides gras polyinsaturés (AGPI) du muscle pectoral et augmente celle des acides gras mono-insaturés (Sevcikova et al., 2003). Une baisse similaire de la teneur en lipides et cholestérol du muscle pectoral est observée après une supplémentation en sulfate de Cu de 126 puis 35 ppm (Skrivan et al., 2002). Une supplémentation de 200 ppm en sulfate de Cu concomitante à un apport d'huile de colza (5%) entraîne une baisse de la teneur en acides gras saturés (AGS) et une augmentation du rapport AGPI : AGS au niveau du gras abdominal (Skrivan, et al., 2000). Une baisse de cholestérol était, par ailleurs, observée dans le muscle pectoral. Cet effet serait lié à une baisse de l'activité de la 7 alpha-hydroxylase (Konjufca et al., 1997).

La stabilité à l'oxydation de la viande est dépendante de l'équilibre entre composés anti- et pro-oxydants mais aussi de la composition en substrats oxydatifs incluant notamment les AGPI et le cholestérol. Cette complexité explique sans doute les résultats controversés des études relatives à l'effet des oligo-éléments sur la stabilité à l'oxydation. Notons que l'oxydation des lipides est très rapide dans la viande de dinde comparée à la viande de poulet, et intermédiaire pour le canard. La faible susceptibilité à l'oxydation de la viande de poulet pourrait s'expliquer en partie par sa plus forte teneur en α -tocophérol (Gong et al., 2010). La conservation de la viande de poulet en milieu réfrigéré entraîne un phénomène d'oxydation lipidique qui s'aggrave avec le temps de stockage (Igbasan et al., 2011). Ce phénomène semble plus marqué dans la cuisse par rapport au pilon. Une observation similaire a été faite pour la viande de dinde congelée (Bartov et Kanner, 1996). Dans ces conditions, un apport de Cu sous forme de sulfate, acétate ou oxyde (150 à 250 ppm) améliore la stabilité à l'oxydation de la viande avec une baisse de la teneur en MDA. Le sulfate de Cu serait le plus efficace pour

améliorer la stabilité à l'oxydation de la viande par rapport à l'acétate ou à l'oxyde de Cu.

Cet effet positif n'a cependant pas été confirmé par Ajuwon et al. (2011) qui montrent une stimulation de la peroxydation lipidique au niveau hépatique et sanguin chez des poulets recevant une supplémentation en sulfate de Cu pendant 6 semaines (250 ppm). Cette observation s'accompagne d'une baisse de l'activité de la SOD et de la catalase, et de la concentration en GSH dans ces compartiments (Ajuwon et al., 2011). De la même façon, une meilleure stabilité à l'oxydation de la cuisse de poulet après cuisson est observée lorsque le Fe ou le Zn est retiré du complément minéral (Ruiz et al., 2000).

D'une façon générale, l'alimentation a peu d'effet sur la tendreté de la viande. Ce paramètre est surtout impacté par l'âge, le sexe, le génotype et les techniques d'abattage et de traitement post-mortem des carcasses. Une étude rapporte, cependant, un effet positif d'une supplémentation en Zn minéral ou organique chez le poulet (60 à 180 ppm) sur la tendreté de la cuisse (Liu et al., 2011). Cet effet serait lié à la modulation du pH ultime qui est plus alcalin chez les animaux ayant reçu la supplémentation en Zn.

3.2.3. Qualité technologique

En conditions post-mortem, le métabolisme des tissus se détériore rapidement. Les dommages cellulaires occasionnés par l'oxydation accentuent les pertes en eau au cours de la conservation et de la transformation. Par leurs effets antioxydants, les oligo-éléments pourraient ainsi influencer les caractéristiques technologiques de la viande telles que sa capacité de rétention d'eau.

Le sélénium modifie la physiologie du muscle. En tant que cofacteur de la GSH-Px, le Se agit conjointement avec la vitamine E pour combattre les dommages causés par la peroxydation lipidique au niveau cellulaire. Une supplémentation en Se (0,3 ppm) et vitamine E (100 IU) chez le poulet améliore la stabilité à l'oxydation des lipides dans les muscles rouges (Kim et al., 2010). Elle s'avère moins efficace dans la viande blanche probablement en raison de la moindre teneur en acides gras. Par ailleurs, une déficience en Se ou vitamine E augmente l'incidence des viandes PSE (pâle, molle et exsudative ; Wang et al., 2009). Une supplémentation en vitamine E combinée à un apport de Se réduit l'impact négatif de la déficience en Se chez le dindonneau. L'inclusion de sources organiques de Se chez le poulet (levures sélénées, 0,05 à 0,3 ppm) a pour effet de réduire les pertes en eau des filets (Downs et al., 2000). Les pertes en jus après cuisson des filets sont réduites de 21 à 16% chez des poulets recevant un régime enrichi en levures sélénées (0,15 à 0,60 ppm; (Oliveira et al., 2014). L'apport de Se sous forme organique est plus efficace que l'apport sous forme minérale. Cet effet

positif sur les pertes en jus des filets n'est cependant pas confirmé pour une viande de dinde stockée à 4°C pendant 48 h après une supplémentation de 0,3 à 0,5 ppm de Se (Juniper et al., 2011).

Chez le poulet, une supplémentation en Zn de 40 à 80 ppm améliore la capacité de rétention en eau du filet de près de 10 points par rapport au témoin (Salim et al., 2011). Liu et al. (2011) rapportent également une réduction des pertes en eau du filet et de la cuisse au cours de la conservation après une supplémentation en Zn de 60 à 180 ppm et ce, quelle que soit la forme d'apport, minérale (ZnSO₄) ou organique (Zn-AA et Zn-protéinate).

CONCLUSION

La qualité des produits est en partie dépendante de l'apport d'oligo-éléments. L'enrichissement des œufs et de la viande en Se, I et Fe est techniquement possible mais limitée principalement du fait de la réglementation et dans une moindre mesure des seuils de toxicité, ou des effets sur les performances de

croissance. Néanmoins, ces produits peuvent participer de façon significative à la couverture des besoins en oligo-éléments chez l'homme en contribuant à réduire les risques de carence ou pour lutter contre le stress oxydant à l'origine de nombreuses maladies chroniques. Les qualités organoleptiques et technologiques des viandes sont également susceptibles d'être modulées par l'apport d'oligo-éléments avec des effets relativement controversés sur la stabilité à l'oxydation et les pertes en eau associées. La multitude de facteurs (technique d'abattage, génotype, âge, traitement post-mortem des carcasses) susceptibles d'intervenir explique probablement ces effets contradictoires d'une étude à l'autre. De plus, le rôle ambivalent des oligo-éléments, facteur pro- ou antioxydant selon les conditions, complique la maîtrise de leurs effets. Il convient donc aujourd'hui de préciser les effets des oligo-éléments sur la qualité des produits en conjonction avec les autres facteurs de façon à prendre en compte les interactions potentielles. Cette démarche d'évaluation devra également intégrer les retombées en matière d'environnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ajuwon O. R., Idowu O. M. O., Afolabi S. A., Kehinde B. O., Oguntola O. O. and Olatunbosun K. O. 2011. Arch. Zootec. 60:275-282.
- Aoyagi S. and Baker D. H. 1993. J. Nutr. 123:870-875.
- Aydemir T., Ozturk R., Bozkaya L. A. and Tarhan L. 2000. Cell Biochem. Funct. 18:109-115.
- Baltic M. Z., Starcevic M. D., Basic M., Zenunovic A., Ivanovic J., Markovic R., Janjic J. and Mahmutovic H. 2015. Anim. Feed Sci. Technol. 210:225-233.
- Bartov I. and Kanner J. 1996. Poult. Sci. 75:1039-1046.
- Bennett D. C. and Cheng K. M. 2010. Poult. Sci. 89:2166-2172.
- Bouvarel I., Nys Y. and Lescoat P. 2011. Hen nutrition for sustained egg quality. Pages 261-299 in Improving the safety and quality of eggs and egg products Woodhead.
- Briens M., Mercier Y., Rouffineau F., Vacchina V. and Geraert P. A. 2013. Br. J. Nutr. 110:617-624.
- Buckley W. T. 2000. Trace elements dynamics in Farm animal metabolism and nutrition CABI.
- Chinrasri O., Chantiratikul P., Thosaikham W., Atiwetin P., Chumpawadee S., Saenthaweesuk S. and Chantiratikul A. 2009. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 22:1661-1666.
- Chowdhury S. D. 1990. World Poult. Sci. J. 46:153-169.
- Downs K. M., Hess J. B. and Bilgili S. F. 2000. J. Appl. Anim. Res. 18:61-71.
- Emmert J. L. and Baker D. H. 1995. Poult. Sci. 74:1011-1021.
- Funk M. A. and Baker D. H. 1991. J. Anim. Sci. 69:4505-4511.
- Gong Y., Parker R.S. and Richards M.P. 2010. J. Food Chem. 34:869-885.
- Hunt J.R. 2003. Am. J. Clin. Nutr. 78(suppl):633S-9S.
- Igbasan F. A., Akinsanmi S. K., Onibi G. E. and Adu O. A. 2011. Int. J. Agric. Res. Rev. 1:53-58.
- Jing C. L., Dong X. F., Wang Z. M., Liu S. and Tong J. M. 2015. Poult. Sci. 94:965-975.
- Jlali M., Briens M., Rouffineau F., Mercierand F., Geraert P. A. and Mercier Y. 2013. J. Anim. Sci. 91:1745-1752.
- Jondreville C., Revy P. S., Jaffrezic A. and Dourmad J. Y. 2002. INRA Prod. Anim. 15:247-265.
- Juniper D. T., Phipps R. H. and Bertin G. 2011. Animal 5:1751-1760.
- Kim Y. J., Park W. Y. and Choi I. H. 2010. Poult. Sci. 89:603-608.
- King J. C., Shames D. M. and Woodhouse L. R. 2000. J. Nutr. 130:1360s-1366s.
- Klasing K. C. 2000. In. CABI, New-York, USA.
- Konjufca V. H., Pesti G. M. and Bakalli R. I. 1997. Poult. Sci. 76:1264-1271.
- Leach J. R. M. and Gross J. 1983. Poult. Sci. 32:499-504.
- Li S., Luo X., Liu B., Crenshaw T. D. and Kuang X. 2004. J. Anim. Sci. 82:2352-2363.

- Li S. F., Lu L., Hao S. F., Wang Y. P., Zhang L. Y., Liu S. B., Liu B., Li K. and Luo X. G. 2011. J. Nutr. 141:189-194.
- Liu X. F., Li Z. P., Tie F., Liu N., Zhang Z. W. and Xu S. W. 2013. Chemosphere 90:2085-2100.
- Liu Z. H., Lu L., Li S. F., Zhang L. Y., Xi L., Zhang K. Y. and Luo X. G. 2011. Poult. Sci. 90:1782-1790.
- Lu L., Luo X. G., Ji C., Liu B. and Yu S. X. 2007. J. Anim. Sci. 85:812-822.
- Luo X. G., Su Q., Huang J. C. and Liu J. X. 1991. Chin. J. Anim. Vet. Sci. 22:313-317.
- Luo X. G., Su Q., Huang J. C. and Liu J. X. 1992. Chin. J. Anim. Vet. Sci. 23:97-101.
- Mann S., Archibald D. D., Didymus J. M., Douglas T., Heywood B. R., Meldrum F. C. and Reeves N. J. 1993. Science 261:1286-92.
- Mertz W. 1987. Trace elements in human and animal nutrition. W. Mertz ed. Academic Press, Inc., London.
- Min B. and Ahn D. U. 2005. Food Sci. Biotechnol. 14:152-163.
- Nys Y. 2001. Prod. Anim. 14:171-180.
- Nys Y., Hincke M. T., Arias J. L., Garcia-Ruiz J. M. and Solomon S. E. 1999. Avian Poult. Biol. Rev. 10:143-166.
- O'dell B. L. 1992. Nutr. Rev. 50:48-50.
- Oliveira T. F. B., Rivera D. F. R., Mesquita F. R., Braga H., Ramos E. M. and Bertechini A. G. 2014. J. Appl. Poult. Res. 23:15-22.
- Osman M. and Latshaw J. D. 1976. Poult. Sci. 55:987-994.
- Ozturk-Urek R., Bozkaya L. A. and Tarhan L. 2001. Cell Biochem. Funct. 19:125-132.
- Park S. W., Namkung H., Ahn H. J. and Paik I. K. 2004a. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 17:1725-1728.
- Park S. Y., Birkhold S. G., Kubena L. F., Nisbet D. J. and Ricke S. C. 2004b. Biol Trace Elem Res 101:147-63.
- Percival S. S. 1998. Am. J. Clin. Nutr. 67:1064s-1068s.
- Richards J. D., Zhao J. M., Harrell R. J., Atwell C. A. and Dibner J. J. 2010. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 23:1527-1534.
- Rosenblum C. I. and Leach R. M. 1985. Biol Trace Elem Res 8:47-63.
- Ruiz J. A., Perez-Vendrell A. M. and Esteve-Garcia E. 2000. Br. J. Nutr. 41:163-167.
- Saki A. A., Farisar M. A., Aliarabi H., Zamani P. and Abbasinezhad M. 2012. J. Agric. Technol. 8:1255-1267.
- Salim H. M., Lee H. R., Jo C., Lee S. K. and Lee B. D. 2011. Korean J. Food Sci. Anim. Resources 31:207-214.
- Schiavone A. and Barroeta A. C. 2011. Egg enrichment with vitamins and trace minerals. Pages 289-320 in Improving the safety and quality of eggs and egg products Woodhead, Cambridge.
- Sevcikova S., Skrivan M., Skrivanova V., Tumova E. and Koucky M. 2003. Czech J. Anim. Sci. 48:432-440.
- Skrivan M., Sevcikova S., Tumova E., Skrivanova V. and Marounek M. 2002. Czech J. Anim. Sci. 47:275-280.
- Skrivan M., Skrivanova V., Marounek M., Tumova E. and Wolf J. 2000. Br. J. Nutr. 41:608-614.
- Stahl J. L., Cook M. E. and Greger J. L. 1988. J. Food Comps. Anal. 1:309-315.
- Sullivan J. F., Williams R. V., Wisecarver J., Etzel K., Jetton M. M. and Magee D. F. 1981. Proc. SOc. Exp. Biol. and Med. 166:39-43.
- Surai P. F. 2016. Anim. nutr. 1:1-17.
- Surai P. F., Papazynan T. T., Speake B. K. and Sparks N. H. C. 2007. Enrichment in selenium and other trace elements in Bioactive egg compounds Springer, Berlin, Germany.
- Suttle N. 2010. In. 4th ed. CABI.
- Wang Z. G., Pan X. J., Peng Z. Q., Zhao R. Q. and Zhou G. H. 2009. Poult. Sci. 88:1096-1101.
- Xiao J. F., Zhang Y. N., Wu S. G., Zhang H. J., Yue H. Y. and Qi G. H. 2014. Poult. Sci. 93:380-388.
- Xu J. X., Cao C. Y., Sun Y. C., Wang L. L., Li N., Xu S. W. and Li J. L. 2014. Biol Trace Elem Res 159:174-182.
- Yalcin S., Kahraman Z., Yalcin S., Yalcin S. S. and Dedeoglu H. E. 2004. Br. J. Nutr. 45:499-503.
- Yu Y., Lu L., Luo X. G. and Liu B. 2008. Poult. Sci. 87:1146-1155.
- Zhang Z. W., Wang Q. H., Zhang J. L., Li S., Wang X. L. and Xu S. W. 2012. Biological Trace Element Research 149:352-361.

Tableau 2. Besoins et normes réglementaires pour les principaux oligo-éléments (mg/kg d'aliment)

	Besoin NRC ¹		Besoin INRA ²		Règlementation ³
	Croissance	Ponte	Croissance	Ponte	UE
Zinc, Zn	40	44	60	50	120
Cuivre, Cu	8	-	50	10	25
Fer, Fe	80	56	10	60	750
Manganèse, Mn	60	25	-	40	150
Sélénium, Se	0,15	0,08	-	0,1	0,5
Iode, I	0,35	0,044	0,10	0,3	5

¹Nutrient Requirements of Poultry, 9ème édition, 1994.

²Nutrition et alimentation des volailles, 1992.

³Teneur maximale autorisée, European Food Safety Authority.